CYCLES BIOGÉOCHIMIQUES DU CALCIUM, DU MAGNÉSIUM, DU POTASSIUM ET DU MANGANÈSE DANS LES PREMIÈRES PHASES DE LA PÉDOGÉNÈSE ACIDE EN COLONNES EXPÉRIMENTALES *"IN SITU"*

par

J.-Cl. Vedy *

RÉSUMÉ

Les facteurs fondamentaux influençant l'efficacité du cycle biogéochimique des éléments majeurs (Ca, Mg, K et Mn) sont mis en évidence et étudiés grâce à une expérience de terrain qui reconstitue, dans deux « matériaux » minéraux (sable gréseux triasique et arène granitique calco-alcaline de Senones) et sous deux types de litières (améliorante et acidifiante), les premières phases de la pédogénèse acide à l'étage montagnard.

SUMMARY

The main factors which determine the effectiveness of the biological cycle of the major elements (Ca, Mg, K and Mn) are made obvious and studied by means of an experiment *in situ* which reconstitute, in two weathered parent-rocks (standstone and granite sand) and under two types of litters, the one know to induce mull horizons, the other, to induce mor horizons, the first stage of acid-pedogenesis under a moutain's climate.

L'expérience de « lysimétrie modifiée », antérieurement décrite (Duchaufour et *al.*, 1968), nous a permis de comparer, *in situ*, l'évolution du carbone et de l'azote (Duchaufour et *al.*, 1968), des acides organiques et des composés humiques (Nguyen Kha et *al.*, 1969 ; Vedy et Bruckert 1970), du calcium, du potassium et du manganèse (Vedy et *al.*, 1971) dans deux types de « matériaux » purement minéraux (sable gréseux et arène granitique) soumis, pendant 5 ans, à l'influence d'une litière à décomposition

* Collaboration technique : E. Jeanroy et P. Jeanson.

rapide correspondant à la sapinière-hêtraie à fétuque (sol brun acide à mull), et d'une litière à décomposition beaucoup plus lente, caractérisant la pineraie à callune (podzol à humus brut).

Cette expérience étant arrivée à son terme, il nous paraît utile de préciser le rôle de la litière dans la géochimie des cations alcalins, alcalino-terreux et du manganèse pendant les phases initiales de la pédogénèse acide en climat montagnard et de présenter sous forme de bilans complets la synthèse des résultats acquis à ce jour. La comparaison avec les profils en place peut être faite car le dispositif lysimétrique reproduit d'assez près les conditions naturelles, du moins à la fin de la cinquième année ; à cette époque il est en effet possible de différencier dans les cylindres :

— un horizon L constitué par les résidus des litières décomposées (apport initial et recharges annuelles) ;

— un horizon intermédiaire A_1, organo-minéral, résultant du brassage mécanique (lombrics) et biochimique des litières et du « matériau » minéral ;

— quatre horizons minéraux constituant l'ébauche des horizons (B) : 0-2 cm, 2-5 cm, 5-35 cm, 35-45 cm.

Nous traiterons séparément :

— de l'horizon L : bilan global de la décomposition des litières ;

— des horizons minéraux, A_1 compris : comportement géochimique des cations d'une part, bilan complet dans la colonne de sol d'autre part.

I. - METHODES

La détermination des bilans géochimiques des cations alcalins, alcalino-terreux et du manganèse repose sur des méthodes analytiques simples permettant de caractériser les différentes fractions minérales et organiques du complexe d'altération dans les horizons étudiés ; ces techniques font appel aux différences de solubilité des minéraux et des composés humiques dans certains réactifs décrits par ailleurs (VEDY *in* DUCHAUFOUR, 1968) et que nous rappellerons ici :

— les formes « *mobiles* » (solubles, échangeables *s. str.*, et complexées organiques pseudosolubles) sont extraites par le sel disodique de l'acide éthylène-diaminetétraacétique successivement à pH 6 et à pH 12 ;

— les « *réserves minérales mobilisables* » se solubilisent partiellement dans le réactif associant le tétraphénylborate de sodium (NaTPB) à l'EDTA-disodique à pH 3,8 selon un mode opératoire dérivé de celui de SMITH et SCOTT (1966) ;

— les formes « *résiduelles* » incluent les minéraux peu ou pas altérés et certains composés humiques insolubles (= humine) : elles sont calculées par différence avec les éléments totaux dosés par absorption atomique après fusion au métaborate de strontium (JEANROY, 1972).

II. - CARACTERISTIQUES CHIMIQUES DES LITIERES FRAICHES ET DES « MATERIAUX » MINERAUX INITIAUX

A. Les litières fraîches

Les éléments totaux (moyenne de 5 prélèvements) sont inscrits au tableau I. Nous remarquons :

— les taux élevés en calcium des écorces de pin sylvestre alors que les teneurs en magnésium, mais surtout en potassium et en manganèse, sont très faibles ;

— la richesse en manganèse des espèces caractéristiques du mull, ce qui confirme de très nombreuses observations dont celles de ROUSSEAU (1960) et de VALLÉE (1966) et l'abondance caractéristique du potassium dans les feuilles de graminée (DUVIGNEAUD et *al.*, 1962 ; HOHNE 1963 ; DENAEYER DE SMET 1964) par ailleurs moins bien pourvues en calcium, en magnésium et en manganèse.

Si nous tenons compte des apports totaux de matière sèche, soit 2.500 g pour la litière du mor et 2.170 g pour la litière du mull, nous constatons que le milieu « améliorant » met à la disposition des colonnes minérales un peu moins de magnésium (7/10), autant de calcium, mais 2,6 fois plus de potassium et 11 fois plus de manganèse que le milieu « acidifiant ».

Les éléments minéraux hydrosolubles * (tableau I) nous fournissent d'utiles renseignements sur les processus de mise en solution des cations tels qu'ils

* Obtenus par macération pendant 12 heures d'une litière dans dix fois son poids d'eau.

TABLEAU I

Distribution des cations alcalins, alcalino-terreux et du manganèse dans les litières fraîches

	Calcium			Magnésium			Potassium			Manganèse		
	1	2	×	1	2	×	1	2	×	1	2	×
Litière « acidifiante »	14,6	0,72	5	6,05	0,53	9	7,3	2,9	40	0,72	0,13	18
Constituants de la litière acidifiante :												
— écorce de pin ..	12,5	0,18	1	3,1	0,16	5	0,9	0,11	12	0,069	Tr.	—
— aiguilles (pin) ..	19,5	0,61	3	7,8	0,40	5	10,5	4,7	45	1,40	0,21	15
— callune	10,3	1,70	17	6,8	2,02	30	9,3	4,1	44	0,47	0,08	17
Litière « améliorante »	17,7	1,70	10	4,75	0,72	15	21,9	11,2	51	9,0	3,42	38
Constituants de la litière améliorante :												
— fétuque	15,5	1,72	11	4,1	0,67	16	32,2	15,6	49	5,9	0,30	5
— sapin	25,6	0,92	3	3,7	0,42	11	10,8	4,7	44	14,5	5,65	39
— hêtre	16,4	5,10	31	6,9	2,18	32	9,9	7,5	76	11,1	4,46	41

(Résultats en m.e./100 g de matière sèche à 105° C)

1 = éléments totaux

2 = éléments hydrosolubles

$$\times = \text{rapport} \ \frac{\text{hydrosolubles}}{\text{éléments totaux}} \times 100$$

TABLEAU II

Analyse totale des « matériaux » minéraux initiaux
Résultats en ‰

	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	MnO	MgO	CaO	Na_2O	K_2O	TiO_2	P. au feu
Grès initial	900	47,5	9,3	0,19	1,66	0,29	1,40	20,3	2,0	16
Granite initial	640	155	46,0	0,62	24,2	13,6	22,4	44	9	39

TABLEAU III

Diversification des formes du calcium, du magnésium, du potassium et du manganèse dans les « matériaux » minéraux initiaux

	Ca_1	Ca_2	Ca_3	Mg_1	Mg_2	Mg_3	K_1	K_2	K_3	Mn_1	Mn_2	Mn_3
Grès initial	0,04	0,30	0,73	0,02	0,12	8,14	0,07	0,24	43,5	0,29	0,10	0,17
Granite initial	1,34	6,80	42,3	0,36	0,89	122,7	0,24	1,62	95,6	0,20	0,42	1,19

Résultats en m.e./100 g de matière sèche à 105° C

1 = formes « mobiles »

2 = « réserves mobilisables »

3 = résidu non extractible

peuvent se réaliser au cours du premier lessivage d'automne. C'est ainsi que nous mettons en évidence :

— la très forte solubilité du potassium puisqu'une seule extraction libère de 40 % (litière du mor) à 51 % (litière du mull) de la totalité des réserves ; en valeur absolue les apports sont presque 4 fois plus importants sous la litière « améliorante » ;

— le faible lessivage du calcium (moins de 10 % du total) ;

— l'opposition « litière du mull-litière du mor » en ce qui concerne le manganèse dont la concentration est 26 fois plus élevée dans les hydrosolubles des espèces « améliorantes ».

B. Le sable gréseux et l'arène granitique initiaux

Les tableaux II et III font apparaître que le sable gréseux (grès vosgien triasique) est pauvre en réserves minérales, mobilisables ou totales, et plus particulièrement en calcium, en manganèse et en magnésium alors que l'arène granitique (granite calco-alcalin de Senones) renferme des concentrations élevées en ces mêmes éléments exception faite, toutefois, pour le manganèse, qui demeure à un niveau relativement bas.

III. - BILAN DANS LES LITIERES EVOLUEES : MATIERE TOTALE ET CATIONS

La décomposition biochimique d'une litière peut être mesurée par la perte de matière sèche ; cette diminution pondérale s'effectue selon trois processus :

— entraînement à l'état soluble et pseudosoluble du carbone, de l'azote et des éléments minéraux par les pluies et les eaux de fonte des neiges ;

— pertes sous forme gazeuse du carbone et éventuellement de l'azote ;

— incorporation mécanique d'une fraction de la litière ancienne au substratum minéral sous-jacent, ce qui conduit, très progressivement, à la constitution de l'horizon organo-minéral A_1.

A l'horizon L (litière évoluée) nous rattachons la fraction « libre » de la matière organique incorporée à l'horizon A_1 ; nous ne pouvons malheureusement pas tenir compte dans le bilan des horizons L des fragments de matière organique fraîche immobilisés sur les particules minérales des horizons A_1 et qui constituent, dans les agrégats, « l'humine résiduelle d'oxydation », inséparable de la matière minérale ; mais cette cause d'erreur est toutefois minime.

A. Taux de décomposition des litières (tableau IV)

Nous constatons :

— d'une part que la litière « améliorante » se décompose plus rapidement que la litière « acidifiante », les différences étant particulièrement marquées au niveau des horizons L ;

— et que, d'autre part, l'incorporation mécanique de matière organique à l'horizon A_1 est, pour la litière « améliorante », environ deux fois plus forte sur grès que sur granite.

B. Bilans des cations des horizons L : taux de lessivage et pertes

Le lessivage du *potassium* est très intense puisqu'il se traduit par des pertes représentant plus de 90 % des apports biologiques ; cette évolution biochimique du potassium est d'ailleurs conforme aux résultats acquis par l'étude des hydrosolubles de litières fraîches (tableau I) et elle ne semble pas dépendre du mode de décomposition physique et chimique des débris végétaux.

L'entraînement du *calcium* est plus important dans les litières « améliorantes » ; par comparaison avec le calcium hydrosoluble de la matière organique fraîche, il apparaît que le lessivage de ce cation augmente quand progresse la biodégradation des débris végétaux.

Le *manganèse* ne se concentre pas au sein des litières qui correspondent au muil, ce qui entraîne des pertes élevées.

Pour chacun des éléments, l'évaluation des pertes en m.e. (tableau IV) correspond donc à ***l'apport biologique net*** **dont ont bénéficié les horizons minéraux.** Ce bilan appelle néanmoins quelques remarques. Dans les horizons A_1, la matière organique « libre », séparée des fractions « liées » par densimétrie, subit des transformations biochimiques différentes des litières constituant les horizons L. Evoluant au contact du complexe minéral d'altération et héritant des composés solubles et pseudosolubles originaires de l'horizon L, la matière organique

TABLEAU IV

Apports totaux, poids résiduels et pertes globales de matière sèche et d'éléments minéraux

	Litière acidifiante sur grès					Litière améliorante sur grès					Litière acidifiante sur granite					Litière améliorante sur granite				
	Poids mg	Ca me	Mg me	K me	Mn me	Poids mg	Ca me	Mg me	K me	Mn me	Poids mg	Ca me	Mg me	K me	Mn me	Poids mg	Ca me	Mg me	K me	Mn me
Apports totaux par cylindre (en poids)	2.500	366	151	183	18	2.170	384	103	476	196	2.500	366	151	183	18	2.170	384	103	476	196
Poids résiduels par cylindre :																				
— L	740	157	31	16	7	340	82	15	11	43	850	142	51	17	8	420	122	37	17	62
— A_1	547	67	56	34	6	570	63	67	47	41	546	70	65	14	8	279	34	35	10	21
— L + A_1	1.287	224	87	50	13	910	145	82	58	84	1.396	212	116	31	16	699	156	72	27	83
Pertes totales par cylindre (en poids)	1.213	142	64	132	5	1.260	239	21	418	112	1.104	154	35	152	2	1.471	228	31	449	113
Pertes totales par cylindre (en %)	49	39	43	72	28	58	63	21	88	57	45	42	23	83	11	68	60	30	95	58

« libre » peut partiellement compenser ses pertes par lessivage en retenant certains cations sur son complexe absorbant. Nous rappellerons, à cet effet, la très forte augmentation de la capacité d'échange de la matière organique au cours de sa décomposition (NGUYEN KHA et *al.*, 1969). En admettant qu'il y a enrichissement du complexe absorbant de la matière organique « libre » de l'horizon A_1 lorsque la concentration d'un élément y est supérieure à celle de l'horizon L, nous observons une adsorption certaine de *potassium* et de *magnésium* identique pour les deux types de matière organique mais plus accentuée dans les colonnes de grès. Le comportement de la fraction surnageante des horizons A_1 vis-à-vis du *calcium* originaire des horizons L et du calcium provenant du complexe minéral d'altération apparaît par contre très différent : il ne semble pas y avoir fixation sur le complexe absorbant de la matière organique mais au contraire accentuation des pertes de calcium biologique.

IV. - CYCLES BIOGEOCHIMIQUES ET BILAN GLOBAL DES CATIONS DANS LES PROFILS MINERAUX

A. Cycles biogéochimiques

L'interprétation du cycle biogéochimique des éléments minéraux dans les profils naturels repose sur les deux notions de mobilisation biologique et de mobilisation chimique (JUSTE 1965 ; DUCHAUFOUR 1968). Dans un peuplement forestier, les plantes prélèvent au sol, par l'intermédiaire des racines, des éléments minéraux (= mobilisation biologique) dont une partie fait annuellement retour au sol par la litière (= apport biologique) ; simultanément les « réserves minérales mobilisables » se solubilisent partiellement par voie microbienne (BERTHELIN 1971) et sous l'action de certains composés organiques agressifs originaires des litières (BRUCKERT et JACQUIN 1969), ce qui conduit, dans tous les profils, à des pertes par lessivage (= mobilisation chimique = altération biochimique).

Dans les sols biologiquement actifs à humus de type mull, certains éléments comme le calcium et le manganèse se concentrent, presque exclusivement, dans les horizons A_1 ; dans ces profils le rapport : apport-biologique / « réserves mobilisables » de la roche-mère peut être élevé ou non ; dans le premier cas (ex. : grès vosgien), la comparaison des concentrations de l'élément étudié dans les horizons C et A_1 fait apparaître un *gain* en A_1, ce qui signifie que l'apport-biologique l'emporte nettement sur la mobilisation chimique ; dans le second cas (ex. : granite calco-alcalin de Senones) la même comparaison fait ressortir une *perte* en A_1 bien qu'il y ait toujours rétention partielle de l'apport biologique : dans ce cas, en effet, l'altération (effet soustractif) est très supérieure à la mobilisation biologique (effet additif). Le tableau V indique, à titre d'exemple, les valeurs de ce rapport *dans les conditions de l'expérience* et il nous permet d'opposer les deux « matériaux » minéraux par rapport à la litière « améliorante ».

TABLEAU V

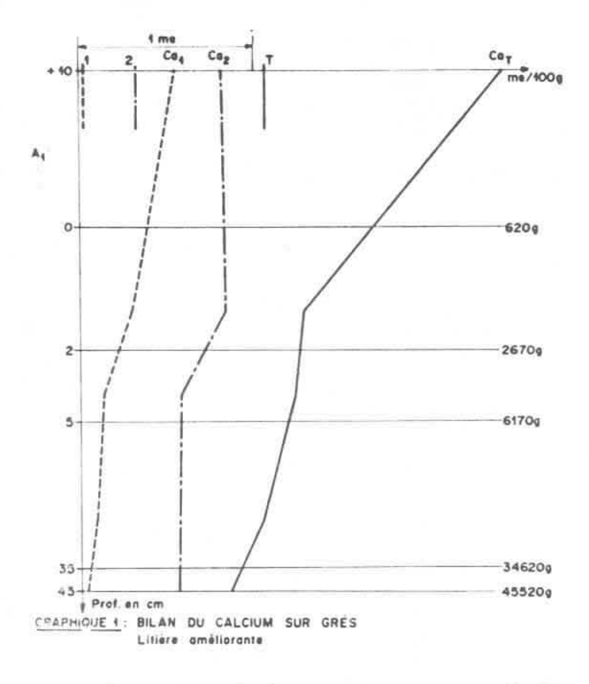
	Ca	Mg	K	Mn
Grès	1,5	0,3	3,0	0,6
Granite	0,07	0,07	0,65	0,5

Dans les sols à faible activité biologique à humus de type moder ou mor, l'apport biologique diffuse dans les profils, quelle que soit la valeur du rapport précédemment défini ; la comparaison des concentrations en C et en A_1 fait presque toujours apparaître un *déficit* en A_1, déficit d'autant plus fort que la roche-mère est riche en minéraux altérables.

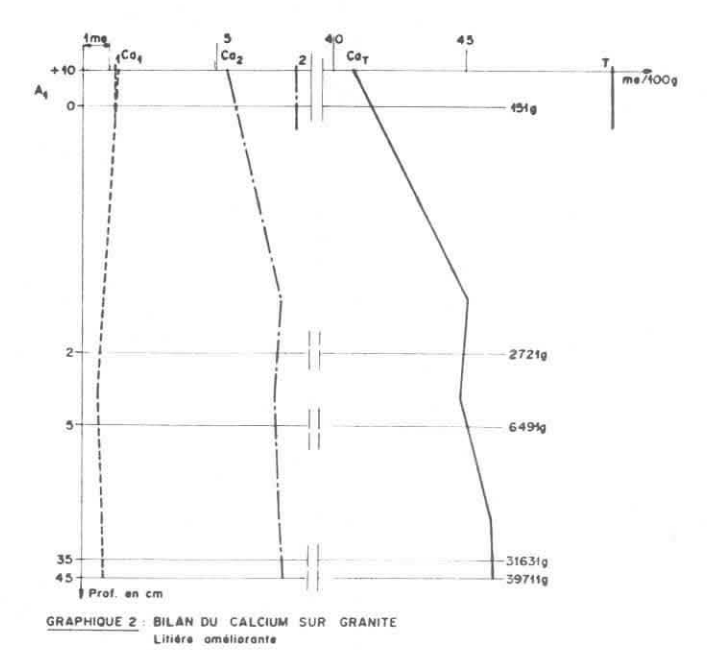
L'étude initiale du cycle biogéochimique des cations dans les horizons A_1 et (B) des colonnes expérimentales confirme l'intérêt de faire constamment appel à ces concepts de « mobilisation ».

L'interprétation des cycles biogéochimiques du calcium, du potassium et du manganèse ayant été précédemment donnée (VEDY et *al.*, 1971) et se trouvant confirmée par les résultats des prélèvements effectués en septembre 1971, nous ne rappellerons que les caractéristiques fondamentales de chaque évolution ; quatre graphiques illustrent à titre d'exemple l'évolution de Ca et de Mn, notamment dans les horizons A_1.

1° *Calcium* (graphiques 1 et 2 ; tableau VI). Dans les horizons A_1 des profils expérimentaux nous mettons en évidence l'importance du facteur « roche-mère » au cours des phases initiales de la biogéochimie du calcium en milieu acide ; dans le sable



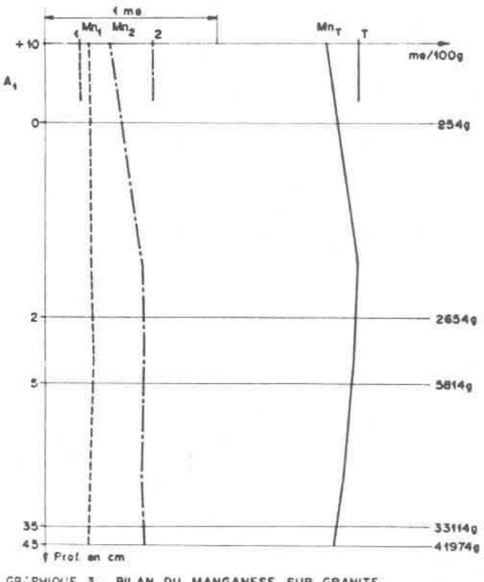
GRAPHIQUE 1 : BILAN DU CALCIUM SUR GRÈS
Litière améliorante



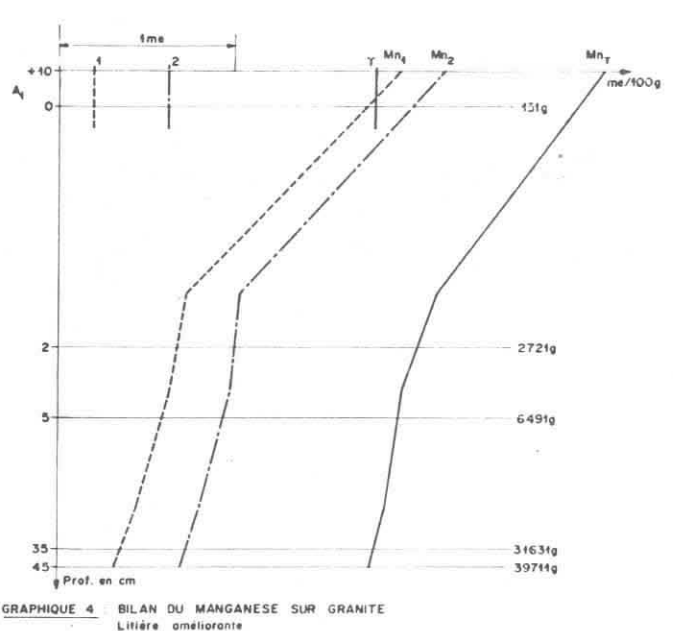
GRAPHIQUE 2 : BILAN DU CALCIUM SUR GRANITE
Litière améliorante

1 = Formes mobiles ; 2 = Réserves minérales mobilisables ; T = Eléments totaux

N.B - Abcisse : échelle décimale , Ordonnée : échelle logarithmique



GRAPHIQUE 3 BILAN DU MANGANESE SUR GRANITE
Litière acidifiante



GRAPHIQUE 4 BILAN DU MANGANESE SUR GRANITE
Litière améliorante

gréseux qui est en effet pauvre en minéraux calciques nous constatons qu'une partie du calcium-biologique pseudosoluble se concentre dans les horizons A_1 par insolubilisation et polymérisation des précurseurs humiques (augmentation des formes complexées organiques alcalinosolubles et des formes non extractibles liées à l'humine) ; dans l'arène granitique, par contre, l'altération biochimique prédomine car les réserves calciques mobilisables sont importantes. Par la suite, le facteur « humification » devient déterminant car dans les horizons A_1 formés à partir de la litière « améliorante » et du sable gréseux l'accumulation du Ca-biologique est une fois et demie plus forte que dans les horizons A_1, biologiquement moins actifs du mor.

2° *Manganèse* (tableau VII). Le cycle biogéochimique du manganèse dépend initialement de l'apport-biologique qui est, rappelons-le, 11 fois plus important sous la litière « améliorante » que sous la litière « acidifiante », dans les conditions de l'expérience. Les « réserves mobilisables » des « matériaux » minéraux sont négligeables, de sorte que dans les horizons A_1 élaborés sous la litière habituellement génératrice d'un mull nous observons une accumulation de manganèse biologique partiellement sous forme complexée organique extractible, partiellement sous forme « rétrogradée », c'est-à-dire liée à des composés humiques insolubles : cette évolution étant étroitement liée aux processus d'humification et aux conditions d'oxydo-réduction des humus biologiquement actifs, il est normal de constater que dans les horizons A_1 constitués sous la litière habituellement génératrice d'un mor, la migration du manganèse biologique est intense.

3° *Potassium* (tableau VIII). La répartition des formes du potassium dans les profils expérimentaux nous indique que le cycle biogéochimique de cet élément n'est pas comparable à ceux du calcium et

TABLEAU VI

Calcium — Evolution des formes « mobiles », des « réserves mobilisables » et des formes « résiduelles » non extractibles

	Colonne « témoin »			Colonne sous litière acidifiante			Colonne sous litière améliorante		
	Ca_1*	Ca_2*	Ca_3*	Ca_1	Ca_2	Ca_3	Ca_1	Ca_2	Ca_3
GRES									
Horizon :									
— A_1				0,41	0,30	0,82	0,45	0,37	1,14
— 0-2	0,03	0,04		0,21	0,65	0,28	0,31	0,54	0,44
— 2-5	0,04	0,02	0,80	0,12	0,50	0,43	0,15	0,45	0,65
— 5-35	0,03	0,02		0,08	0,58	0,34	0,09	0,48	0,48
— 35-45	0,04	0,02	0,85	0,04	0,65	0,22	0,04	0,52	0,35
Grès initial	0,04	0,30							
GRANITE									
Horizon :									
— A_1				1,90	3,99	39,9	1,38	3,70	35,1
— 0-2	0,29	8,28		0,81	7,86	38,4	0,79	6,69	37,6
— 2-5	0,32	9,45		0,57	7,60	36,3	0,57	6,67	37,7
— 5-35	0,81	7,54		0,80	7,70	38,3	0,65	6,80	38,6
— 35-45	0,89	8,29		1,02	7,80	37,4	0,77	6,88	38,6
Granite initial	1,34	6,80	42,5						

* = résultats en me/100 g de M.S. à 105° C

Ca_1 = formes hydrosolubles, échangeables s. str., complexées organiques extractibles

Ca_2 = réserves minérales mobilisables

Ca_3 = formes résiduelles non extractibles (minéraux calciques non altérés + formes rétrogradées organiques)

Tableau VII

Manganèse — Evolution des formes « mobiles », des « réserves mobilisables » et des formes « résiduelles » non extractibles

	Colonne « témoin »			Colonne sous litière acidifiante			Colonne sous litière améliorante		
	Mn_1*	Mn_2*	Mn_3*	Mn_1	Mn_2	Mn_3	Mn_1	Mn_2	Mn_3
GRES									
Horizon :									
— A_1				0,055	0,014	0,08	0,527	0,029	0,21
— 0-2	0,176	0,120		0,095	0,034	0,10	0,443	0,040	0,28
— 2-5	0,229	0,120	0,10	0,245	0,051	0,10	0,438	0,054	0,19
— 5-35	0,222	0,148		0,250	0,065	0,13	0,390	0,085	0,17
— 35-45	0,238	0,123	0,12	0,260	0,074	0,19	0,371	0,098	0,08
Grès initial	0,287	0,096	0,16						
GRANITE									
Horizon :									
— A_1				0,257	0,15	1,24	2,08	0,24	0,90
— 0-2	0,080	0,46		0,270	0,30	1,24	0,733	0,31	1,13
— 2-5	0,093	0,50	1,23	0,286	0,29	1,22	0,649	0,34	0,99
— 5-35	0,130	0,39		0,265	0,30	1,20	0,450	0,37	1,08
— 35-45	0,110	0,45	1,27	0,252	0,32	1,13	0,343	0,38	1,10
Granite initial	0,204	0,42	1,20						

* = résultats en me/100 g de MS à 105° C
Mn_1 = formes hydrosolubles, échangeables, complexées organiques extractibles
Mn_2 = réserves minérales mobilisables + Mn « facilement réductible » (forme minérale)
Mn_3 = formes résiduelles non extractibles (minérales et organiques)

Tableau VIII

Potassium — Evolution des formes « mobiles », des « réserves mobilisables » et des formes « résiduelles » non extractibles

	Colonne « témoin »			Colonne sous litière acidifiante			Colonne sous litière améliorante		
	K_1*	K_2*	K_3*	K_1	K_2	K_3	K_1	K_2	K_3
GRES									
Horizon :									
— A_1				0,084	0,10	34,6	0,112	0,10	35,7
— 0-2	0,056	0,10		0,086	0,27	44,0	0,122	0,24	44,5
— 2-5	0,052	0,17	43,6	0,089	0,36	43,6	0,098	0,17	43,7
— 5-35	0,059	0,31		0,084	0,39	43,7	0,122	0,24	43,2
— 35-45	0,074	0,34	43,2	0,079	0,41	44,0	0,142	0,27	42,7
Grès initial	0,072	0,24	43,5						
GRANITE									
Horizon :									
— A_1				0,215	0,37	91,5	0,207	0,47	94,4
— 0-2	0,065	0,99		0,151	1,06	98,0	0,182	1,16	99,8
— 2-5	0,071	1,18	95,8	0,165	1,17	97,9	0,194	1,21	97,4
— 5-35	0,20	1,45		0,250	1,48	99,2	0,280	1,52	99,4
— 35-45	0,24	1,41	96,5	0,348	1,65	101,0	0,325	1,77	102,8
Granite initial	0,24	1,62	95,6						

* = résultats en me/100 g de MS à 105° C
K_1 = formes hydrosolubles, échangeables
K_2 = réserves minérales mobilisables + formes rétrogradées minérales
K_3 = formes résiduelles non extractibles

du manganèse. Le potassium biologique ne s'accumule pas dans les horizons A_1 mais diffuse en profondeur dans les horizons (B) au sein desquels il peut « rétrograder » selon un processus très différent de ceux précédemment décrits à propos du calcium et du manganèse. Pour expliquer cette biogéochimie, nous prendrons l'exemple des milieux « améliorants » ; l'apport biologique de potassium est deux fois et demie plus importante sous la litière du mull que sous la litière du mor et cette mise en solution s'effectue à l'état de sels d'acides minéraux ; dans les profils, le potassium peut s'immobiliser par fixation entre les feuillets des minéraux argileux ; ultérieurement, l'activité nitrificatrice importante dans les milieux biologiquement actifs élimine une partie du potassium par lessivage et drainage profond. Les pertes par altération biochimique dépendent de l'importance des réserves minérales effectivement « mobilisables ».

4° *Magnésium* (tableau IX). Sa biogéochimie dans notre expérience et à ce stade de l'évolution paraît être différente de celle du calcium. Il ne s'accumule pas dans les horizons A_1 en quantité suffisante pour compenser les pertes par altération-biochimique. Dans les horizons (B) par contre la mobilisation chimique est peu marquée.

B. **Bilan global des cations dans les profils minéraux**

A la fin de la cinquième année, nous pouvons faire, par colonne et pour chaque élément, deux types de bilans :

— le bilan global « *brut* » nous est donné par la formule

$$\Sigma \mid C_i - C_o \mid P_i = \text{bilan global « brut »}$$

dans laquelle C_o et C_i représentent les concentrations de l'élément dans le « matériau» minéral initial (C_o) et dans un horizon du profil expérimental (C_i) et P_i, le poids de l'horizon.

Ce bilan peut être positif, nul ou négatif suivant que l'apport-biologique est plus grand, égal ou inférieur à l'altération-biochimique.

TABLEAU IX

Magnésium — Evolution des formes « mobiles », des « réserves mobilisables » et des formes « résiduelles » non extractibles

	Colonne « témoin »			Colonne sous litière acidifiante			Colonne sous litière améliorante		
	Mg_1*	Mg_2*	Mg_3*	Mg_1	Mg_2	Mg_3	Mg_1	Mg_2	Mg_3
GRES									
Horizon :									
— A_1				0,124	0,08	3,45	0,062	0,16	3,55
— 0-2	0,022	0,25		0,099	0,19	7,62	0,099	0,15	7,67
— 2-5	0,027	0,16	7,32	0,066	0,30	7,48	0,069	0,14	7,59
— 5-35	0,024	0,15		0,035	0,11	7,65	0,043	0,12	7,44
— 35-45	0,037	0,18	7,54	0,033	0,33	7,59	0,026	0,33	7,16
Grès initial	0,036	0,15	8,09						
GRANITE									
Horizon :									
— A_1				0,78	1,34	116,2	0,38	1,26	100,3
— 0-2	0,08	0,68		0,28	1,27	121,8	0,12	0,88	123,7
— 2-5	0,07	0,75	119,2	0,17	0,96	115,5	0,13	0,82	117,2
— 5-35	0,24	0,73		0,30	1,10	119,2	0,10	0,77	118,3
— 35-45	0,30	0,94	121,7	0,31	0,80	117,0	0,13	0,77	119,5
Granite initial	0,30	1,01	122,7						

* = résultats en me/100 g de M.S. à 105° C
Mg_1 = formes hydrosolubles, échangeables
Mg_2 = réserves minérales mobilisables
Mg_3 = formes résiduelles non extractibles

— Le bilan global « net » fait intervenir l'apport-biologique total A selon

$$A - \Sigma \mid C_i - C_o \mid P_i = D$$
$$= \text{bilan global « net »}$$

où D représente *les pertes par drainage*, qui résultent pour une part du lessivage partiel de l'apport-biologique, pour une autre part de l'altération-biochimique. Il est possible d'évaluer très approximativement les pertes dues à la mobilisation biochimique : lorsque le bilan global « brut » est positif, celles-ci sont nulles ou égales au maximum au bilan global « net » ; lorsque le bilan global « brut » est négatif, le déficit dû à l'altération-biochimique est compris entre les valeurs des bilans globaux « brut » et « net ».

1° *Calcium*

TABLEAU X

	Grès		Granite	
	Lit. acid.	Lit. amélior.	Lit. acid.	Lit. amélior.
Bilan « brut » *	+ 92	+ 131	— 671	— 822
Apport-biol. *	+ 142	+ 239	+ 154	+ 228
Bilan « net » *	— 50	— 108	— 825	— 1.050

* Résultats en me/colonne de sol.

Ces résultats nous amènent à faire trois remarques :

— la première concerne *l'apport-biologique*. Dans nos conditions expérimentales, nous observons en effet que les pertes de la litière du mull en Ca-complexé organique pseudosoluble sont 1,5 fois plus importantes que les pertes de la litière du mor, bien que les quantités effectivement apportées aux cylindres par la matière organique fraîche aient été les mêmes (voir tableau IV). Ceci est bien évidemment lié à la décomposition plus rapide de la litière « améliorante », ce qui accélère le processus de mise en solution des éléments et en particulier celui du calcium ;

— la seconde se rapporte aux « *réserves calciques mobilisables* » du « matériau » minéral initial ; lorsque celles-ci sont faibles (sable gréseux), l'apport-biologique prédomine et les bilans globaux « bruts » sont positifs ; lorsque celles-ci sont au contraire fortes (arène granitique) l'altération-biochimique l'emporte et les bilans globaux « bruts » sont alors très nettement négatifs ;

— la troisième a trait aux *évolutions divergentes liées au type de litière*, l'altération-biochimique est en effet plus forte sous la litière « améliorante » comme nous le montrent les bilans globaux « nets », mais l'augmentation des pertes qui en résulte est compensée, et au-delà, par des apports nettement plus élevés.

2° *Manganèse*

TABLEAU XI

	Grès		Granite	
	Lit. acid.	Lit. amélior.	Lit. acid.	Lit. amélior.
Bilan « brut » *	— 10	+ 80	— 18	+ 60
Apport-biologique * ..	+ 5	+ 112	+ 2	+ 113
Bilan « net » *	— 15	— 32	— 20	— 53

* Résultats en me/colonne de sol.

Nous constatons que l'apport-biologique dans une phase très précoce de la pédogénèse, puis, ultérieurement, *les processus d'humification,* très différents sous les litières « améliorante » et « acidifiante » conditionnent presque exclusivement le cycle biogéochimique du manganèse puisque les bilans globaux « bruts » sont positifs dans les milieux mull, négatifs dans les milieux mor. Les bilans globaux « nets » nous indiquent que le déficit par drainage est plus fort sous la litière « améliorante » mais qu'il y a compensation des pertes et au-delà par des apports très élevés ; le « matériau » minéral a un rôle tout à fait secondaire.

3° *Potassium*

TABLEAU XII

	Grès		Granite	
	Lit. acid.	Lit. amélior.	Lit. acid.	Lit. amélior.
Bilan « brut » *	# 0	— 132	# 0	+ 314
Apport-biologique * ..	+ 132	+ 418	+ 152	+ 449
Bilan « net » *	— 132	— 550	— 152	— 135

* Résultats en me/colonne de sol.

Les résultats opposent les deux litières et pour la litière « améliorante » les deux « matériaux » minéraux. Sous la litière « acidifiante », en effet, l'apport-biologique, 3,5 fois moins important que sous la litière « améliorante », compense les pertes par drainage (bilan global « brut » = 0). Sous la litière « améliorante » et dans les colonnes de sable gréseux, les bilans globaux sont très nettement négatifs, ce qui indique la prépondérance de la mobilisation chimique sur l'apport-biologique entraînant l'augmentation des pertes par drainage ; dans les colonnes d'arène granitique, par contre, le bilan global « brut » est positif, ce qui est l'indice d'une immobilisation partielle du potassium-biologique.

4° *Magnésium*

TABLEAU XIII

	Grès		Granite	
	Lit. acid.	Lit. amélior.	Lit. acid.	Lit. amélior.
Bilan « brut » *	# 0	— 34	— 485	— 511
Apport-biologique * ..	+ 64	+ 21	+ 35	+ 31
Bilan « net » *	— 64	— 55	— 450	— 480

* Résultats en me/colonne de sol.

Concernant les résultats des bilans, nous pouvons faire les remarques suivantes :

— sous certaines conditions réalisées dans les colonnes de sable gréseux, la litière « améliorante » retient le magnésium biologique préférentiellement puisque les apports, initialement peu différents (voir tableau IV), sont, à l'état soluble, 3 fois plus importants sous la litière du mor ;

— les bilans globaux font apparaître l'importance du facteur « roche-mère » puisque les pertes par drainage sont environ 10 fois plus grandes dans l'arène granitique, riche en « réserves mobilisables ».

V. - DISCUSSION

Le cycle biogéochimique des cations tel qu'il est précisé expérimentalement, peut correspondre aux processus initiaux de la pédogénèse acide et par conséquent s'appliquer aux profils naturels des Vosges (climat montagnard) à condition, toutefois, de tenir

compte des *particularités du dispositif expérimental.* En effet, dans le but d'intensifier les phénomènes d'évolution différentielle des « matériaux » minéraux, nous avons été conduits à augmenter considérablement les apports de litière qui ont été 50 fois plus élevés que les retombées spontanées *in situ* la première année, 10 (litière « améliorante ») et 20 (litière « acidifiante ») fois plus élevés au cours des années suivantes ; conjointement nous avons multiplié par 2 la pluviométrie. En outre, le sable gréseux et l'arène granitique remplissant les cylindres après tamisage (5 mm) et homogénéisation possèdent des propriétés physiques proches de celles des « colluviums », milieux très aérés et très filtrants, peu propices aux évolutions divergentes comme cela a pu être montré par ailleurs SOUCHIER 1971). C'est pourquoi les faits observés en début d'expérience diffèrent, en partie, de ce qui doit se réaliser dans les sols en place comme nous l'avons précédemment signalé à propos du carbone et de l'azote (DUCHAUFOUR et *al.*, 1968). L'entraînement massif des composés organiques pseudosolubles originaires des litières a accentué considérablement les pertes par lessivage et drainage profond. La désaturation du complexe minéral d'altération et le déficit qui en est résulté ont été très certainement plus forts sous la litière « améliorante » que sous la litière « acidifiante » ; la matière organique fraîche du mull met en solution davantage de composés organiques « agressifs » susceptibles de mobiliser par altération les cations (BRUCKERT 1970 ; VEDY et BRUCKERT 1970), et, dans les conditions de notre expérience, de les éliminer par lessivage puisque l'entraînement trop rapide ne permet qu'une biodégradation très limitée (BRUCKERT 1970). Nous rappellerons enfin que l'arène granitique choisie renferme des teneurs élevées en fer (46 % de Fe_2O_3) ce qui constitue, en climat montagnard, un frein à la podzolisation (SOUCHIER 1971). Néanmoins, et malgré les inconvénients inhérents au protocole expérimental, cette expérience de courte durée a permis de recréer schématiquement et en les décomposant, les mécanismes biochimiques fondamentaux de la pédogénèse acide qu'elle contribue donc à mieux expliquer ; à cet égard les enseignements que l'on peut tirer pour le calcium, le manganèse et le potassium sont exemplaires.

L'interprétation des faits expérimentaux que nous venons de rappeler n'est possible que par l'étude simultanée de l'évolution de la matière organique fraîche et des processus d'humification dans les horizons A_1 et (B) (NGUYEN KHA et *al.*, 1969 ; VEDY et BRUCKERT 1970 ; VEDY et *al.* 1972).

1° Le cycle biogéochimique du *calcium* est, initialement, sous la dépendance de la teneur en minéraux calciques mobilisables par altération biochimique de la roche-mère. Ainsi sur un « matériau » minéral pauvre en Ca^{2+} total (ex. : grès vosgien triasique) l'apport-biologique (litières du mull, du moder et du mor) doit normalement se traduire par un gain dans les horizons supérieurs de profils puisque les pertes par mobilisation chimique sont faibles ; par contre, sur un « matériau » minéral, riche en Ca^{2+} (ex. : granite calco-alcalin de Senones) nous constatons généralement un déficit dû à la prédominance de l'altération-biochimique sur l'apport-biologique. Ce schéma est en réalité beaucoup plus complexe : sur grès triasique nous observons très souvent que les horizons A_1 des sols bruns acides à mull renferment des concentrations en Ca^{2+} total bien plus élevées que dans les horizons A_0 — A_1 des sols à moder ou à humus brut, bien que les litières « améliorantes » n'apportent souvent guère plus de calcium que les litières « acidifiantes » (DUCHAUFOUR, 1968). Cette divergence d'évolution doit être rattachée aux processus d'humification très différents dans les trois types d'humus. Dans les sols à mull, biologiquement très actifs, le calcium biologique complexé organique s'immobilise très rapidement par polymérisation et insolubilisation des précurseurs humiques ; une partie demeure extractible par un réactif alcalin, l'autre « rétrograde » dans l'humine ; ultérieurement la biodégradation de l'anion complexant remet en solution une fraction du calcium-biologique primitivement « rétrogradé » : celui-ci peut prendre la forme « échangeable » (Ca^{2+}) ou bien être lessivé partiellement, probablement à l'état de sels d'acides minéraux. Dans les sols à mor, par contre, l'activité biologique demeure très faible ; l'immobilisation du calcium-biologique est lente et incomplète, ce qui permet la diffusion en profondeur du Ca-complexé organique qui vient ainsi s'accumuler dans les horizons B spodiques. Dans tous les profils l'altération biochimique conduit à des pertes.

2° Le cycle biogéochimique du *manganèse* présente, comme nous allons le voir, quelques analogies avec celui du calcium ; il est toutefois plus complexe car la mobilité de l'ion Mn dans les profils dépend en partie de son degré d'oxydation. Les roches sédimentaires et cristallines du massif vosgien renferment généralement très peu de manganèse total ; les

retombées biologiques devraient être prépondérantes car nous connaissons de très nombreuses espèces forestières, telles que *Vaccinium myrtillus* (DENAEYER DE SMET 1966), *Abies alba, Fagus silvatica* capables de concentrer le manganèse dans leurs tissus : or nous constatons que dans les sols à mull le manganèse s'accumule dans les horizons A_1 et (B) des profils brun-acides alors qu'il est éliminé par lessivage dans les sols à moder et à mor (ROUSSEAU 1960 ; VALLEE 1966). Dans les profils biologiquement très actifs (sols brun-acides à mull) le manganèse biologique, complexé organique (Mn^{2+}) s'immobilise tout d'abord par polymérisation et insolubilisation des précurseurs humiques (cf. le cycle du calcium). La biodégradation de l'anion complexant le remet ultérieurement en solution mais son lessivage est freiné dans les horizons (B) parce qu'il prend la forme « facilement réductible » comme nous l'avons montré dans un sol brun-acide sur grès rhétien (VEDY et TOUTAIN, 1971). Dans les profils à faible activité biologique prédominent les formes complexées organiques mobiles et les formes minérales réduites, toutes susceptibles d'être lessivées. Le réactif combinant le tétraphénylborate de sodium à l'EDTA disodique à pH 3,8 se révèle particulièrement apte à mettre en évidence l'altération-biochimique de certains minéraux renfermant du manganèse.

3° Comme nous l'avons précédemment rappelé, la biogéochimie du *potassium* diffère de celle du calcium et du manganèse. L'absence d'accumulation biologique dans les horizons A_1 compensée par la possibilité d'une rétrogradation dans les horizons (B) par fixation entre les feuillets des minéraux argileux nous paraissent être les deux caractéristiques principales du cycle du K en sol acide. Le facteur « roche-mère » est donc très important puisqu'il intervient doublement, d'une part par son complexe d'altération susceptible de libérer K^+ par mobilisation chimique, d'autre part par ses minéraux argileux, susceptibles de freiner les pertes par le jeu de la fixation. Deux autres facteurs conditionnent également en partie la biogéochimie du potassium : il s'agit de « l'apport-litière » et de « l'activité nitrificatrice » ; dans les sols à mull l'apport est massif, 2 à 3 fois plus important que dans les sols à moder ou à mor et nous rappellerons à cet effet le rôle des graminées dont les tissus renferment des concentrations élevées en potassium : « l'activité nitrificatrice » n'est élevée que dans les sols biologiquement actifs à humus de type mull et elle conduit à augmenter considérablement les pertes par drainage profond : le potassium migre donc essentiellement sous forme de nitrate de potassium.

4° Le cycle biogéochimique du *magnésium* présente avec celui du calcium certaines analogies. Il est toutefois plus mobile et l'apport-biologique paraît faible au regard des réserves minérales mobilisables des roches-mères. Malgré la rapidité globale de décomposition de la litière annuelle, le magnésium est retenu beaucoup plus énergiquement que le calcium par la matière organique fraîche.

CONCLUSIONS GENERALES

Les facteurs fondamentaux qui conditionnent l'efficacité du cycle biogéochimique des éléments majeurs (Ca, Mg, K et Mn) paraissent être les suivants :

1. Influence de la forme chimique des cations dans les litières

Les cations *solubles* (= sels d'acides minéraux), comme par exemple le potassium, sont très rapidement lessivés et il ne jouent qu'un faible rôle dans la saturation du complexe absorbant des horizons A_1 ; dans les horizons B par contre une partie du K-biologique peut être « fixé » essentiellement par intercalation entre les feuillets des minéraux argileux.

Les cations *pseudosolubles* (= complexés organiques), comme par exemple le calcium, le manganèse et, à un degré moindre, le magnésium, sont retenus beaucoup plus efficacement dans les horizons humifères suivant deux processus distincts :

— par conservation dans les litières incorporées aux horizons A_1 (fraction « surnageante » et humine « résiduelle d'oxydation ») des complexes organiques insolubles et très faiblement biodégradables ; ceci pourrait être le cas du magnésium qui rentre dans la constitution des molécules de chlorophylles ;

— par polymérisation des complexes organiques pseudosolubles ayant migré dans les horizons A_1 ou B ; cette insolubilisation est rapide dans les sols à mull, biologiquement actifs, elle est lente dans les sols à mor ; ce processus de stockage n'est que provisoire et il s'applique essentiellement au calcium et à un degré moindre, au manganèse.

2. **Importance du rapport : apport-biologique annuel/réserves « mobilisables » de l'horizon C.**

Quand ce rapport est élevé les premières phases de la pédogénèse se caractérisent par la prédominance de l'apport-biologique sur l'altération-biochimique. Ceci est évident pour le manganèse dans les sols à mull et pour toutes les roches-mères, et pour le calcium dans les sols à mull et à moder formés sur roches-mères pauvres (ex. : sable gréseux).

Quand ce rapport est au contraire très faible, l'altération-biochimique l'emporte, ce qui est le cas du calcium dans les sols à mull et à moder formés sur arène granitique.

A ce stade très précoce de l'évolution des profils, l'activité biologique du milieu apparaît secondaire.

3. **Importance de la végétation « améliorante » ou « acidifiante ».**

Elle est essentielle pour le manganèse qui s'accumule dans les sols à mull alors qu'il est éliminé par lessivage dans les sols à moder et à mor. Dans notre expérience la végétation ne joue qu'un rôle secondaire pour le calcium et pour le magnésium bien que l'accumulation biologique dans les horizons A_1 apparaisse déjà plus élevée sous les mull ; ceci tient aux conditions de l'expérience : pas de filtre biologique au début, altération plus intense par excès de perméabilité d'où exagération des pertes. En fait, dans les profils en place, l'accumulation de calcium biologique par polymérisation des complexes pseudo-solubles est environ 4 fois plus forte dans les horizons A_1 sous un mull que sous un mor (Toutain 1972).

4. **Les pertes par altération -biochimique** sont apparamment plus importantes sous la litière « améliorante » que sous la litière « acidifiante ». Ces observations rejoignent celles de Souchier (1971) qui relève un taux d'altération plus élevé dans les sols brun-acides que dans les podzols. Ce phénomène est compensé par la vitesse de décomposition initiale des litières « améliorantes » qui est beaucoup plus grande que celle des litières « acidifiantes », ce qui fait qu'en définitive l'apport annuel réel est supérieur sous les mull.

Il est important toutefois de signaler que ceci est une caractéristique des phases initiales de la pédogénèse ; les différences tant pour l'altération que pour la libération des éléments doivent s'atténuer à mesure que l'on se rapproche de l'état d'équilibre (sol « climax »).

BIBLIOGRAPHIE

BERTHELIN J. - 1971. — Altération microbienne d'une arène granitique. Note préliminaire. Science du sol, **1**, 11-29.

BRUCKERT S. et JACQUIN F. - 1969. — Interaction entre la mobilité de plusieurs acides organiques et de divers cations dans un sol à mull et dans un sol à mor. Soil Biol. Biochem., **1**, 275-294.

BRUCKERT S. - 1970. — Influence des composés organiques solubles sur la pédogénèse en milieu acide. Thèse doc. Etat, Nancy, 72 p.

DENAYER DE SMET S. - 1964. — Note sur la composition minérale des graminées et plantes graminoïdes des tapis végitaux naturels de Belgique. Bull. Soc. Roy. de Botanique de Belgique, **97**, 19-25.

DENAYER DE SMET S. - 1966. — Note sur un accumulateur de manganèse : *Vaccinium myrtillus*. L. Bull. Soc. Roy. de botanique de Belgique, **99**, 331-343.

DUCHAUFOUR Ph. - 1968. — L'évolution des sols. Essai sur la dynamique des profils. Masson & Cie, éd., Paris.

DUCHAUFOUR Ph., VEDY J.-Cl. et BRUCKERT S. - 1968. — Contribution à l'étude expérimentale *in situ* de l'évolution chimique et de l'altération d'un grès et d'un granite vosgiens sous l'influence de deux types de litières. I. Evolution du carbone et de l'azote au cours du premier cycle de végétation. Bull. A.F.E.S., **1**, 5-18.

DUVIGNEAUD P., DENAEYER »I SMET S. - 1962. — Distribution de certains éléments minéraux (K, Ca et N) dans les tapis végétaux naturels. Bull. Soc. Fr. de Physiologie végétale, **8**, 8 p.

HOHNE H. - 1963. — Der Mineralstoff- and Stickstoffgehalt von Waldbodenpflanzen in Abhängigkeit vom Standort. Archiv. für Forstwesen Berlin, **12** (8), 791-805.

JEANROY E. - 1972. — Analyse totale des silicates naturels par spectrophotométrie d'absorption atomique. Application au sol et à ses constituants. Chimie anal., sous presse.

JUSTE Ch. - 1965. — Contribution à l'étude de la dynamique de l'aluminium dans les sols acides du sud-ouest atlantique : application à leur mise en valeur. Thèse Ing. Doct. Nancy I.N.R.A., 143 p.

NGUYEN KHA, VEDY J.-Cl. et DUCHAUFOUR Ph. - 1969. — Etude expérimentale de l'évolution saisonnière des composés humiques en climat tempéré. Pédologie Gand, *XIX* (1), 5-22.

ROUSSEAU L. - 1960. — De l'influence du type d'humus sur le développement des plantules de sapin dans les Vosges. Ann. de l'Ecole nationale des Eaux et Forêts, *XVII* (1), Nancy.

SMITH S. J. et SCOTT A. D. - 1966. — Extractable potassium in grundite illite. I. Method of extraction. Soil Sci., **102** (2), 115-122.

SOUCHIER B. - 1970. — Evolution des sols sur roches cristallines à l'étage montagnard. Thèse doct. Etat, Nancy, 140 p.

TOUTAIN F. - 1972. — Etude comparée de deux hêtraies sur grès rhétien : divergences pédoclimatiques et biochimiques. Bull. E.N.S.A.N., sous presse.

VALLÉE G. - 1966. — Nouvelles contributions à l'étude du rôle du manganèse dans la régénération de la sapinière vosgienne. Thèse ing. doct., Nancy, 160 p.

VEDY J.-Cl. et BRUCKERT S. - 1970. — Evolution saisonnière de composés organiques solubles en relation avec divers processus biochimiques d'humification. Pédologie Gand, *XX* (2), 135-152.

VEDY J.-Cl. et DUCHAUFOUR Ph. - 1971. — Cycle biogéochimique du calcium dans les premières phases de la pédogénèse en milieu acide. C. R. Acad. Sc. Paris, **272**, 588-591.

VEDY J.-Cl. et DUCHAUFOUR Ph. - 1971. — Cycle biogéochimique du potassium dans les premières phases de la pédogénèse en milieu acide. C. R. Acad. Sc. Paris, **272**, 1598-1601.

VEDY J.-Cl. et TOUTAIN F. - 1971. — Cycle biogéochimique du manganèse en milieu acide. C. R. Acad. Sci., **273**, 136-139.

VEDY J.-Cl. et al. - 1972. — Formation « in situ » d'horizons humifères sur « matériau » acide en présence de litières améliorante ou acidifiante (sous presse).